

# INTRODUCCIÓN AL ESTUDIO DE LOS MECANISMOS DE DESGASTE MECÁNICOS.

**Dr. C. Ing. Eduardo Torres Alpízar<sup>1</sup>**

*1. Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”, Vía Blanca  
Km.3, Matanzas, Cuba.*

## **Resumen.**

Los fenómenos de desgaste en piezas metálicas provocan cada año pérdidas cuantiosas de recursos materiales y monetarios en la economía mundial. Conocer los mecanismos de desarrollo del desgaste en los diferentes materiales y procesos tecnológicos o productivos ayuda a disminuir las pérdidas a la economía. Este tipo de destrucción afecta tanto a los elementos de máquinas que trabajan en condiciones de lubricación forzada, como los engranajes de transmisiones, como a aquellos expuestos al efecto de las variables meteorológicas, así como influye en piezas que están sometidas a cargas insignificantes, como a aquellas que se someten a grandes cargas de impacto. Esta monografía pretende constituir un material didáctico para introducir a los estudiantes de la carrera de ingeniería mecánica en el estudio de los mecanismos del desgaste mecánico.

***Palabras claves:*** *Materiales, desgaste, deterioro, metalografía, abrasión, cavitación, erosión.*

---

- **El Desgaste como fenómeno destructivo.**

El desgaste no es más que un concepto general y muy complejo, resultado de la heterogénea actuación de procesos físico-químicos, que se manifiestan en el cambio de las medidas y la masa de los elementos de máquinas, lo cual constituye un problema tanto para la industria como para cualquier otro sector en el cual pueda aparecer dicho fenómeno.

El desgaste no se considera una propiedad inherente del material, pues solo se produce por la interacción de los cuerpos en contacto o en movimiento y está determinado, en gran medida, por condiciones externas independientes de la naturaleza del material.

El desgaste en la maquinaria es uno de los factores que más influye en la depreciación de una fábrica. Por lo tanto se pueden reducir los costos o aumentar los beneficios prolongando la vida de la maquinaria.

En el mundo existen una serie de aleaciones, que empleadas adecuadamente, pueden contribuir a evitar los siguientes inconvenientes:

- Paros de producción
- Gastos por reparación
- Retraso de las entregas
- Reclamaciones
- Pérdida de ventas

El aspecto fundamental en la solución de este problema es el anticiparse a los tipos de desgaste a los cuales estarán sujetos los componentes.

En una superficie sólida solo existen tres vías para remover material: por fundición, por disolución química y por separación química y mecánica de los átomos de la superficie. El último método puede ser efectuado por la aplicación al mismo tiempo de una alta deformación o deformaciones cíclicas de bajas magnitudes

Los procesos mecánicos y químicos pueden operar separadamente o juntos, tales como la abrasión en medios corrosivos.

El desgaste se define como deterioro debido al uso. Generalmente el desgaste consiste en el desprendimiento de partículas de la superficie de un cuerpo y/ó el desplazamiento de material de zonas en contacto, hacia zonas libres de carga. Un enfoque sistémico debido a (Czichos, 1976) enumera los factores que influyen en el desgaste como:

a) Variables operacionales.

Carga aplicada.  
Velocidad.  
Temperatura y  
Tipo de Movimiento.

b) Variables Estructurales del Sistema Tribológico.

b1) Propiedades volumétricas de los dos cuerpos en contacto.

Geometría.  
Dimensiones.

Composición química.  
Microestructura.  
Dureza, etc.

b2) Propiedades superficiales de los cuerpos en contacto.

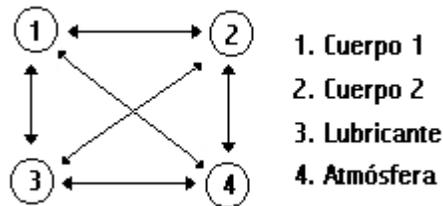
Rugosidad  
Microdureza, etc.

b3) Área de contacto entre los cuerpos.

b4) Propiedades de los lubricantes interpuestos.

b5) Características de la atmósfera.

b6) Interacciones entre los cuatro posibles triboelementos.



Interacciones entre los cuatro Tribo-elementos.

Una discriminación de la importancia relativa de distintos tipos de desgaste en la industria, ha sido estimada por (Eyre, 1978) en los siguientes términos:

<b>Tipo de Desgaste</b>	<b>% de presencia</b>
Abrasión	50 %
Adhesión	15 %
Erosión	8 %
Desgaste micro-oscilatorio ("Fretting")	8 %
Desgaste químico	5 %

En la práctica no existe un ejemplo práctico donde se manifieste un tipo de desgaste únicamente. Normalmente uno de estos tipos se transforma en otro ó en los que dos ó mas de ellos coexisten.

En varios de estos tipos de desgaste se han observado dos regímenes de funcionamiento claramente diferenciados. Estos regímenes han sido denominados Desgaste Suave y Desgaste Severo. En el último de ellos se han detectado velocidades de desgaste de 4 a 100 veces mayores que en el primero. Es obvia la importancia de poder predecir en cual de los

dos regímenes de desgaste va a operar un determinado sistema tribológico, a fin de aprovechar los materiales de la manera más efectiva.

En la actualidad se recomienda, en base a patrones establecidos y a conocimientos publicados en revistas técnicas, ejecutar ensayos de simulación acelerados en el laboratorio, utilizando la microtopografía de las superficies desgastadas y/ó las partículas de desgaste, como base para la calibración de los ensayos. También se recomienda calcular el llamado Coeficiente de Desgaste  $k$ , como herramienta de diagnóstico y predicción:

$$k = \frac{3 V D}{F_n d}$$

Donde  $k$  representa la probabilidad de que en un encuentro entre dos asperezas de las superficies en contacto, se produzca una partícula de desgaste,  $V$  es el volumen desgastado, en una distancia deslizada  $d$ , por una superficie de dureza  $D$  (la menos dura de las dos superficies), bajo una fuerza normal  $F_n$ .

Este coeficiente ha sido calculado y clasificado dentro de una dispersión relativamente alta por (Rabinowicz, 1981), en base a la recopilación de una gran cantidad de resultados publicados por diversos autores en revistas especializadas. De esta manera elaboró una tabla que permite determinar si el coeficiente de desgaste  $k$  calculado, para un sistema determinado, está dentro de los límites esperados. Esta clasificación permite analizar diferentes parejas de metales, en base a su compatibilidad metalúrgica (solubilidad mutua de los metales), para diversos tipos de desgaste.

El enfoque propuesto por este investigador permite determinar el tipo de desgaste, el mecanismo del proceso ó la efectividad de la lubricación. En base a este método se puede tomar la decisión de sustituir uno ó los dos materiales de las superficies en contacto, de mejorar el sistema de lubricación ó de estudiar mejor las características de movimiento y de las cargas del sistema tribológico, en el caso de que el análisis produzca resultados absurdos.

Uno de los factores que dificulta mas la predicción del desgaste es que el comportamiento en relación a este fenómeno no es una propiedad intrínseca del material, sino que depende de todo el tribosistema en el cual el cuerpo que se desgasta interacciona. Por esta razón, entre otras, hay que tener cuidado al aplicar soluciones generales a problemas específicos. Un cambio en los parámetros de operación puede tener mejores resultados que sustituir materiales ó modificar superficies. Sin embargo, en muchos casos esto no es posible ó no es deseable y entonces, el diseño de las superficies para las condiciones específicas de operación se ha hecho mas importante, particularmente con el fin de reemplazar cuerpos de materiales costosos por materiales mas económicos, revestidos por diferentes procesos (termorrociado, soldadura, implantación iónica, etc.).

Existen productos comerciales de costo relativamente alto, utilizados para recubrir superficialmente piezas de materiales de bajo costo. Se presume que estos productos son ensayados por los fabricantes antes de ser lanzados al mercado. Sin embargo, la complejidad de los fenómenos tribológicos es tal, que pequeñas desviaciones de la condición del ensayo pueden significar parámetros de funcionamiento completamente diferentes. Por esta razón se hace necesario, a fin de reducir costos de operación y mantenimiento, que exista una estrecha comunicación entre la instalación industrial y el laboratorio de Tribología.

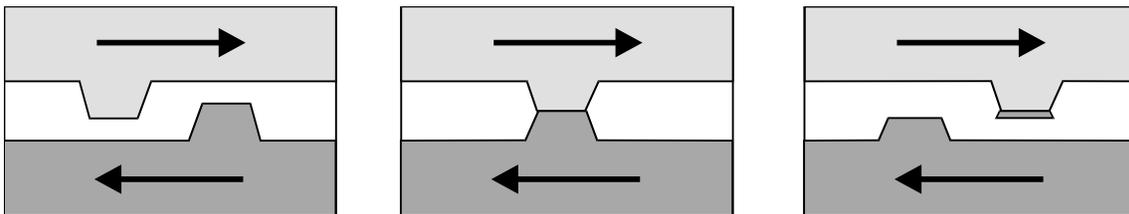
## Clasificación de los desgastes

### Deslizamiento.

#### Rozamiento metal-metal

Ocurre como consecuencia de un movimiento relativo entre dos superficies en contacto y se manifiesta por pérdida de forma y desprendimiento de virutas. El fenómeno se explica a escala macroscópica donde en las superficies pulidas se aprecian crestas y valles. Cuando se intenta deslizar una sobre la otra aparece una fuerza de fricción que trata de evitar el movimiento causado por la deformación de las asperezas en contacto.

Esta fuerza causa soldaduras locales en los puntos de intersección de las crestas de ambas superficies. Para que el deslizamiento continúe las asperezas se rompen en su lado más débil.



**Soldaduras locales en puntos de intersección de dos superficies en contacto**

La velocidad de desgaste es función de un gran número de factores de los cuales los más importantes son:

- Cargas actuantes
- Velocidad
- Temperatura
- Área de contacto real
- Limpieza de superficies

Una variable de significación es la estructura metalográfica. Materiales de estructura similar tienen una mayor tendencia a las soldaduras localizadas. Si los materiales que rozan son de estructuras muy disímiles es menos probable que ocurra el fenómeno de adhesión y se reduce la susceptibilidad a este tipo de desgaste.

### Rodadura. Fatiga por contacto.

Resultado de un constante esfuerzo mecánico de la superficie de un cuerpo que rueda sobre otro. El desgaste ocurre entre ambas superficies. Se presenta comúnmente en elementos de

máquinas sujetos a contactos por rodadura tales como rodamientos, ruedas y engranajes. Es difícil de detectar en estado inicial, Suele aparecer como una repentina pérdida de material por resquebrajamiento y estallido.

Este fenómeno está sujeto a un período de incubación anterior a la aparición del daño superficial. Los primeros síntomas suelen ser:

- Aparición de un ruido progresivo
- Aumento progresivo de calor en la zona de la rodadura
- Vibraciones en zonas de precisión
- Aparición de fragmentos producto del desgaste
- Aparición de irregulares picaduras en las superficies de los rodamientos

Este proceso se da generalmente por los siguientes pasos:

1. Acumulación de dislocaciones causadas por una fatiga periódica de la microestructura de la subsuperficie, puede formarse una dislocación de la estructura de la celda.
2. Formación de núcleos, oquedades o microfisuras en las regiones de máxima fatiga o cercanas a discontinuidades en la microestructura.
3. Propagación de la microfisura en la superficie.
4. Esparcimiento del daño a zonas contiguas.
5. Iniciación de fisuras mayores en la superficie o defectos, causando en ocasiones fracturas catastróficas. Esta fisura se propaga paralelamente a la superficie y aparecen fisuras superficiales subsidiarias. Estas fisuras menores por último se juntan formando partículas de desprendimientos.

### **Impacto.**

Se produce por transferencia de energía cinética de un cuerpo simple sobre una superficie de extensión apreciable. Produce deformación superficial y subsuperficial del material que altera su forma y dimensión lo que puede devenir en la fractura por fatiga debido a los impactos repetidos.

### **Cavitación.**

El desgaste por cavitación ocurre cuando un líquido en circulación está sujeto a cambios rápidos de presión que causan formación de burbujas en la región de bajas presiones.

Estas burbujas comienzan a inestabilizarse y a colapsar al entrar en áreas de mayor presión. El ataque continuo sobre la superficie del material por el colapso de estas burbujas es conocido como cavitación. La continua implosión de burbujas causa tensiones cíclicas y fatiga en la superficie del material manifestándose como *pitting* superficial que puede luego actuar como centro de nucleación para ataques corrosivos del medio líquido.

Este tipo de desgaste se produce en elementos en los cuales la dirección del líquido sufre cambios repentinos.

### **Corrosión.**

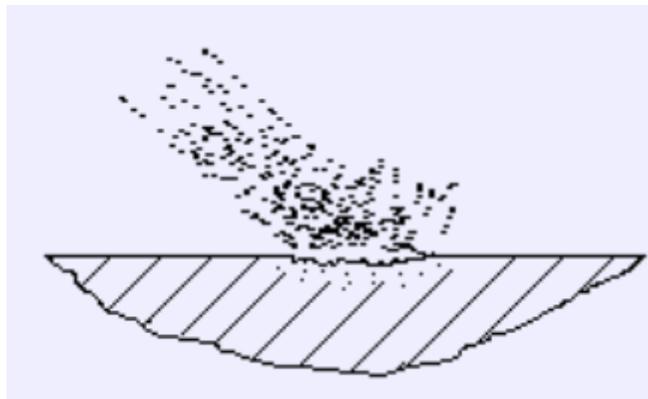
La corrosión de los metales se produce por un proceso químico y electroquímico. La actividad corrosiva de la sustancia destructora depende de factores que influyen sobre el transcurso de la reacción química: temperatura, presión y concentración del factor

corrosivo. La corrosión puede ser también consecuencia de factores tales como la no-homogeneidad química y la estructura de la aleación.

Este mecanismo entonces incluye la interacción entre una superficie de desgaste y un medio corrosivo. Las capas de óxido producto de la corrosión, en el proceso de desgaste, pueden desempeñar tanto una función positiva como negativa. En el primer caso puede citarse el proceso de desgaste por adhesión donde puede ser reducido drásticamente por la presencia de una película de óxido, y en el segundo caso mediante la facilitación de la separación de capas exteriores. Las partículas separadas de las capas de óxido pueden participar igualmente en el desgaste abrasivo incrementándolo. La corrosión es entonces un factor a considerar como suplementario del mecanismo de desgaste principal.

### **Erosión.**

Es la pérdida de material como resultado del impacto repetido de pequeñas partículas. Ocurre cuando partículas duras son atrapadas en un medio líquido o gaseoso que hace impacto sobre un sólido a una velocidad significativa. Las variables fundamentales que influyen en la erosión pura son: la velocidad, ángulo de incidencia, concentración y forma de las partículas. Se considera a la erosión como una forma de abrasión producida por esfuerzos de contacto relativamente bajo, debido al impacto de partículas sobre una superficie.



Erosión

Esta, a consecuencia del proceso, generalmente presenta una apariencia granular fina, similar a la de las fracturas frágiles. El desgaste por erosión está presente, en equipos y líneas de bombeo para fluidos con sólidos en suspensión, boquillas de equipos para granallado por arena (*sand-blasting*), etc.

La velocidad de desgaste por erosión se incrementa con el aumento de la velocidad de las partículas. Si los ángulos de impacto son pequeños predomina el corte abrasivo; siendo la dureza superficial un factor crítico. En caso contrario, si los ángulos de impacto son grandes el desgaste es debido principalmente a deformación y fractura. Un material blando podría resistir mejor la erosión que un material duro. Por ejemplo, el caucho natural ó sintético produce buenos resultados debido a su bajo módulo elástico, lo que le permite grandes deformaciones y una buena distribución de la carga.

Existe una buena correlación entre la resistencia a la erosión y el módulo de resiliencia (R) de un material:

$$R = \frac{S_y^2}{2 E}$$

donde:

S<sub>y</sub>: resistencia a la fluencia y  
E : modulo elástico de Young.

El parámetro R representa la cantidad de energía que podría absorberse por un cuerpo antes de que aparezca una deformación plástica ó fractura, por impacto. Para disminuir la tendencia al desgaste por erosión sería necesario:

- Modificar ángulos de ataque.
- Reducir velocidades.
- Escoger materiales de mejor calidad ó modificar sus superficies.

Además, puesto que la erosión se considera como una forma de abrasión, las recomendaciones para el control del desgaste abrasivo tienen, en general, validez para el desgaste erosivo.

### ***Fretting*. Desgaste Micro-oscilatorio**

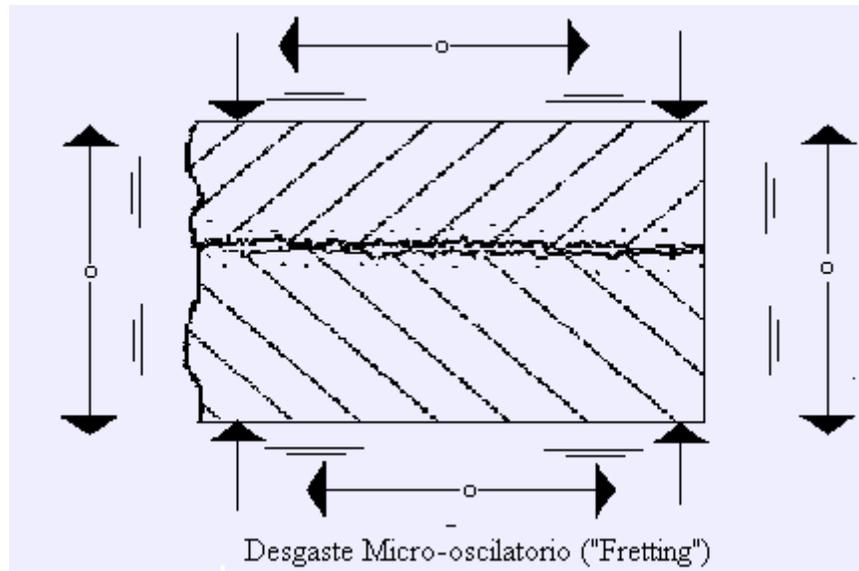
El *fretting* consiste en movimientos oscilatorios de pequeña amplitud que pueden ocurrir entre superficies en contacto. Una de las consecuencias inmediatas de este proceso, en condiciones atmosféricas normales, es la producción de fragmentos de óxido.

Parámetros que lo afectan:

- Amplitud del desplazamiento: Se establece que los movimientos relativos son esenciales. Movimientos extremadamente pequeños, en el orden de unos pocos nanómetros, pueden producir daños.
- Frecuencia: A bajas frecuencias para un número de ciclos determinados ocurre un incremento del volumen de desgaste.

Otros son:

- Carga normal
- Tipos de contacto
- Tipos de vibración
- Acabado de la superficie
- Tensión residual



Esta forma de deterioro se caracteriza por la pérdida de material de superficies en contacto, bajo la acción de una carga y de movimiento deslizante de amplitud muy pequeña ( $130 \mu\text{m} = 5 \text{ mpulg.}$ , por ej.)

Normalmente la apariencia de la superficie es rojiza-marrón (ladrillo) ó gris, con presencia de partículas oxidadas. El desgaste micro-oscilatorio conduce eventualmente a fallas por fatiga y se produce en uniones atornilladas, piezas ajustadas por calado, contactos eléctricos, etc. Diversas teorías que tratan de explicar esta forma de desgaste, se basan en fenómenos de adhesión, abrasión y/o corrosión.

Los factores más importantes que influyen en el desgaste micro-oscilatorio son:

- El aumento de la amplitud del movimiento conduce a otros tipos de desgaste y permite la introducción de lubricantes durante el funcionamiento.
- El aumento de la frecuencia de la oscilación hace disminuir el desgaste y se cree que ello tiene relación con factores químicos.
- Por lo general este tipo de desgaste aumenta con el número de ciclos de funcionamiento.
- La carga normal hace variar el desgaste micro-oscilatorio de manera impredecible.
  - \* Disminuciones de la carga normal producen reducción de la amortiguación de las vibraciones y esto ocasiona mayor desgaste.
  - \* Aumentos de la carga normal reducen las vibraciones, pero aumentan el área de contacto y a su vez el desgaste.

\* No obstante lo antes expuesto, en general, los aumentos de la Carga Normal hacen aumentar este tipo de desgaste.

- La temperatura ambiental también tiene un efecto diverso, aunque mas consistente. A temperaturas muy bajas (- 150 °C) se ha detectado el mayor deterioro y se ha observado que a medida que la temperatura aumenta hasta cero grados centígrados, el desgaste micro-oscilatorio disminuye gradualmente. Con aumentos de temperatura hasta 50 °C, el daño superficial disminuye apreciablemente y por encima de 70 °C comienza de nuevo a aumentar este tipo de desgaste.
- Humedades relativas entre 0 y 50 % reducen el desgaste para la mayoría de los metales. Por encima de 50 %, parejas acero-acero presentan aumentos en la velocidad de desgaste, mientras que la combinación acero-cromo se comporta de mejor manera con decrementos en las velocidades de desgaste.
- Lubricantes sólidos son la mejor opción para este tipo de aplicación; siendo el Bisulfuro de Molibdeno (MoS<sub>2</sub>) el de mejores resultados.
- Las atmósferas inertes ó con bajas concentraciones de oxígeno previenen la oxidación de las superficies en contacto y reducen esta forma de desgaste.
- Un buen acabado superficial es una buena opción para superficies sometidas a deslizamientos micro-oscilatorios, pero rugosidades muy pequeñas (menores de 0.05 µm = 50 nm c.l.a.) pueden impedir la penetración del lubricante y harían aumentar el "fretting".

### **Abrasión.**

Se considera abrasivo el desgaste que sufre la superficie de un metal bajo la acción de partículas abrasivas, que en forma continua rozan dicha superficie, y se provoca un desprendimiento gradual de partículas de la superficie desgastada por la fricción de estas partículas abrasivas. El daño de la superficie supone desplazamiento y separación de partículas, acelerado por el calor desarrollado en la fricción.

Este desgaste puede definirse como la acción que provoca, en una superficie, el movimiento unidireccional de partículas discretas de otro material que generalmente trae consigo pérdidas progresivas de material y está dado por el movimiento relativo entre la superficie y la sustancia que hacen contacto.

El efecto de la abrasión es particularmente evidente en áreas industriales de la agricultura, procesamiento de minerales, movimientos de tierra y esencialmente en cualquier área en que se manipule roca, minerales, escoria, etc.

La velocidad de desgaste depende del grado de penetración del abrasivo en la superficie y por lo tanto es función de la dureza superficial del material. La dureza, la tenacidad y sobre todo la rugosidad de las partículas abrasivas, acentúan la abrasión; mientras que la fragilidad de estas atenúa el efecto

Si la dureza del abrasivo es muy superior a la dureza de la superficie el desgaste es fuerte. Si el abrasivo es más blando la velocidad de desgaste es lenta. Por último, cuando las

durezas son similares un leve cambio del valor de una de ellas puede aumentar considerablemente el desgaste.

Dependiendo de la forma en que el material es desprendido en el proceso de desgaste abrasivo, este puede clasificarse en cinco formas: en forma de labrado, en forma de microfatiga, en forma de microrrajadura, en forma cuneiforme y en forma de microcorte. En este proceso es característico el hecho de que la temperatura no influye sobre el cambio del carácter del proceso, adquiriendo influencia solamente por el cambio de la resistencia de los materiales o abrasivos que se desgastan. El desgaste es casi siempre más elevado en sitios acuosos o simplemente húmedos, y sobre todo en sitios corrosivos.

### **Física-Química del desgaste abrasivo.**

Se considera que todo desgaste abrasivo del material es un agrietamiento por fragilidad, como resultado de actos de deformación plástica y endurecimiento que se repiten cíclicamente.

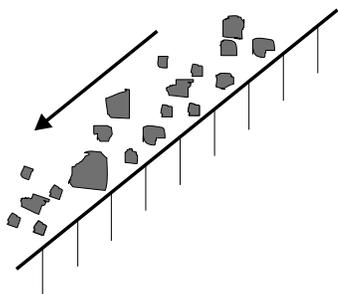
El proceso de desgaste abrasivo en condiciones reales, se realiza siempre con la colaboración no solamente de los granos abrasivos, sino también del medio exterior, de una composición química controlada (en el caso de los medios lubricantes), o no controlada (en el caso de la atmósfera).

El metal deformado plásticamente, al reaccionar con el oxígeno contenido en la atmósfera y en los medios lubricantes, forma estructuras de capas secundarias, que se diferencian del metal original por sus estructuras y propiedades de resistencia. La actuación de las presiones produce la destrucción de estas capas y el descubrimiento consecutivo de nuevas superficies del metal puro. Este fenómeno se conoce con el nombre de desgaste oxidante.

En el desgaste abrasivo influye la dureza y la tenacidad del material. La tenacidad será la resistencia que opone a la rotura el material deformado. El desgaste abrasivo depende también del coeficiente de fricción, fuerza de unión adhesiva entre las partículas de la superficie del metal y las partículas abrasivas. Para mayores valores del coeficiente de fricción más fácil será el proceso de microcorte.

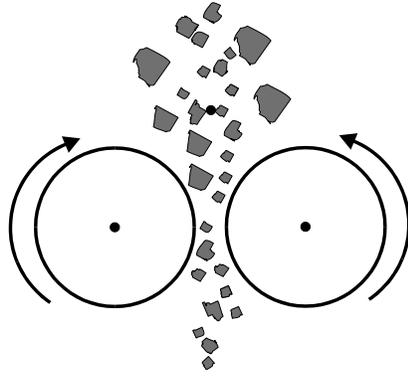
A manera de resumen puede decirse que el grado de abrasión es reflejado mayormente por la naturaleza de las partículas abrasivas, su forma, su tamaño y dureza y por el grado de humedad en la superficie. Otros factores determinantes incluyen la presión o el impacto aplicado por la partícula abrasiva, el ángulo de incidencia con la superficie y la velocidad relativa de las partículas abrasivas en relación con la superficie de desgaste.

- **El desgaste abrasivo puede clasificarse en:**



- **Desgaste abrasivo de baja presión**

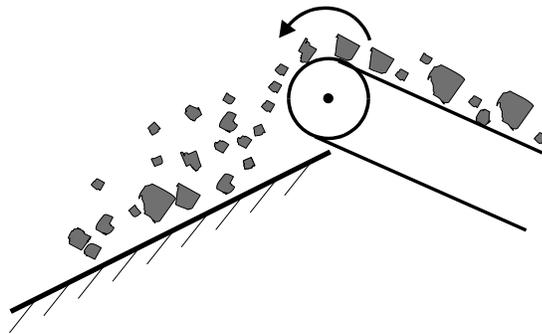
El desgaste ocurre por deslizamiento de partículas moviéndose libremente sobre una superficie y las tensiones actuantes son bajas y no exceden la resistencia a la rotura del abrasivo.



- Desgaste abrasivo de alta presión

En este caso el abrasivo es atrapado entre dos superficies de carga y el desgaste no es solo por penetración sino también por fractura de las partes frágiles y por deformación plástica de la matriz.

Este tipo de abrasión es característica de operaciones de trituración, pero se encuentra también, como efecto secundario, en numerosas aplicaciones metal sobre metal.



- Desgaste abrasivo con impacto

Involucra la remoción de material por la acción de un abrasivo cuyas partículas son de tamaño apreciable e impactan en la superficie bajo un ángulo determinado.

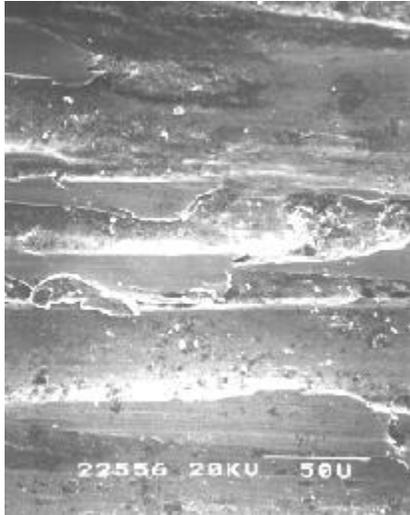
La energía de impacto se transfiere al material y hace que el abrasivo produzca grandes surcos y ralladuras apreciables a simple vista. Este tipo de desgaste es más frecuente en transporte de minerales.

Normalmente los desgastes no se presentan en forma simple, sino que se combinan entre sí:

- **Impacto, abrasión y presión:** rodillos, cadenas y rodaje de tractores
- **Impacto, abrasión y temperatura:** martillos, cuchillas de cizalla
- **Impacto y presión:** martillos pilón y machacadoras, quebradoras
- **Abrasión, erosión y corrosión:** válvulas y asientos, tornillo sinfín
- **Fricción, corrosión y cavitación:** impulsores, álaves de turbinas

En este tipo de desgaste pueden observarse principalmente tres regímenes en dependencia de las durezas de los materiales interactuantes:

- Régimen débil, cuando la dureza del abrasivo es menor que la del metal.
- Régimen de transición, cuando la dureza del abrasivo es aproximadamente igual a la del metal.
- Régimen severo, cuando la dureza del abrasivo es mayor que la del metal.

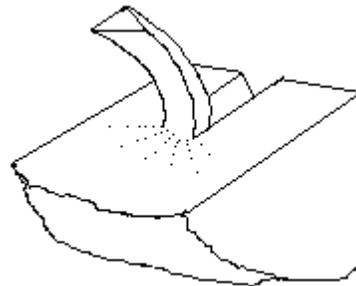


**Combinación de desgastes abrasivo y adhesivo.**

Se considera que el desgaste por abrasión puede tomar dos formas extremas: una en la cual la deformación plástica es lo más importante (Fig. 1) y la otra, en la cual la fractura, con deformaciones plásticas limitadas es lo que predomina (Fig. 2).

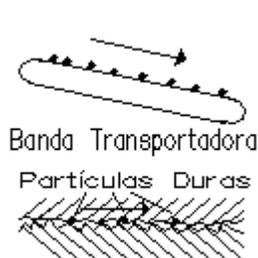


**Figura 1**  
**Abrasión Deformante**



**Figura 2**  
**Abrasión cortante**

Las partículas abrasivas pueden ser inclusiones de una superficie o bien partículas sueltas. Este tipo de desgaste se presenta en equipos de perforación de suelos, trituradoras, molinos de bolas, en algunos casos en cuerpos en contacto deslizante, etc. (Figs. 3 y 4).



**Figura 3**  
**Abrasión entre dos cuerpos.**



**Figura 4**  
**Abrasión entre tres cuerpos.**

En los metales la resistencia a la abrasión aumenta con la dureza; observándose que para los aceros este parámetro resulta ser menor que para metales puros de la misma dureza (Fig. 5).

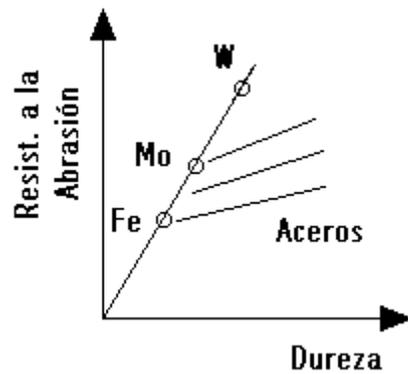


Figura 5  
Influencia de la dureza en la resistencia a la abrasión.

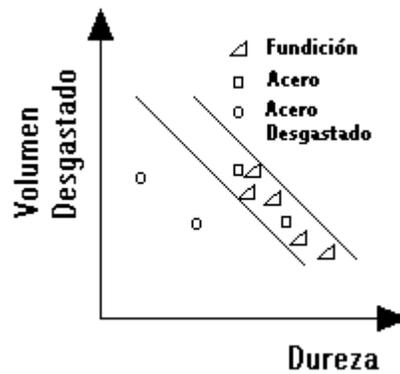


Figura 6  
Efectos de la dureza del material original y desgastado en el desgaste abrasivo.

Es de advertir que esta propiedad en el material desgastado es mas indicativa de la resistencia a la abrasión que la dureza original (Fig. 6).

El contenido de carburos es un factor importante en la reducción de la abrasión en aceros; siendo los carburos de vanadio y niobio mas efectivos que los de cromo y tungsteno (Fig. 7).

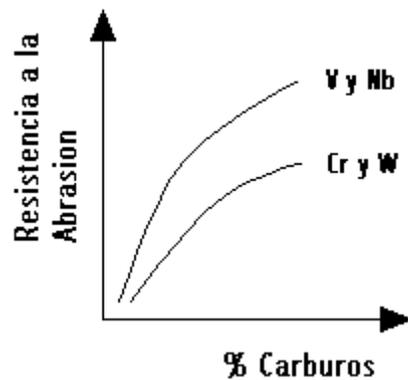


Figura 7  
Efecto de los carburos en la resistencia a la abrasión.

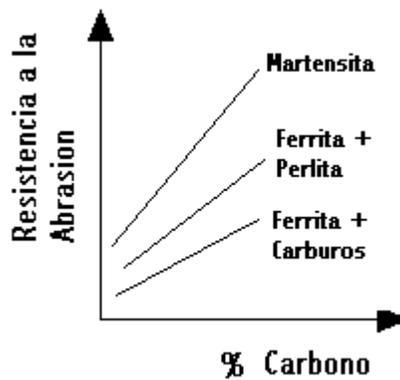


Figura 8  
Influencias del contenido de carbono y de la microestructura en la resistencia a la abrasión.

Por otra parte, se observa en la Figura 8 que el contenido de carbono hace disminuir la abrasión en los aceros y que distintas microestructuras presentan diferentes resistencias al desgaste. De acuerdo al gráfico, se observa que la martensita presenta la mejor resistencia a la abrasión, entre las tres microestructuras que se comparan; pero también se han obtenido buenos resultados con refinamientos de perlita y esto se atribuye a una alta tasa de endurecimiento por deformación.

A fin de obtener un aumento apreciable en la resistencia a la abrasión la dureza superficial debe hacerse mayor que  $1/2$  de la dureza Vickers del abrasivo. No es recomendable, por otra parte, aumentar la dureza de la superficie por encima de 1,3 veces la dureza del abrasivo, ya que esto podría resultar contraproducente.

Como regla general, para los metales ferrosos las mejores resistencias al desgaste se obtienen en matrices martensíticas, con carburos secundarios uniformemente distribuidos. Cuando la dureza de los carburos son aleados, la resistencia al desgaste también aumenta, pero hay que tener en cuenta la dureza de las partículas abrasivas.

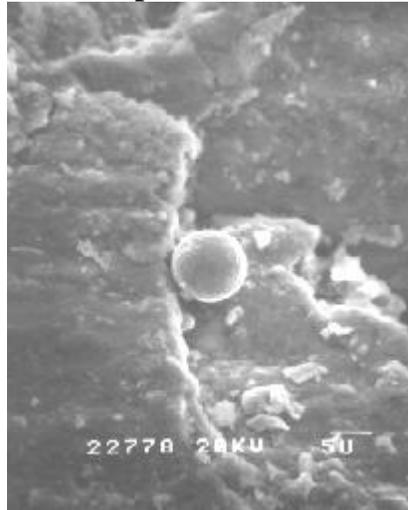
Si se requiere una matriz más tenaz, para condiciones de impactos fuertes, es más recomendable una estructura austenítica inestable, la cual tenderá a endurecerse por deformación o sufrir transformación de fase, o bien ser sometida a ambos procesos durante el trabajo de abrasión.

En relación a las partículas abrasivas: tamaños reducidos, formas redondeadas, disminución de las velocidades y de las cargas de impacto, son todos factores que hacen disminuir la abrasión.

En resumen los factores más importantes que hacen disminuir la abrasión son los siguientes:

- Aumentos de dureza.
- Aumentos del contenido de carbono y de carburos duros.
- Control de la relación entre la dureza de la superficie y del abrasivo.
- Disminución del tamaño de las partículas abrasivas.
- Formas de partículas redondeadas.
- Disminución de velocidades.
- Disminución de cargas.

## Fenómenos Superficiales a Altas Temperaturas



**Partícula esférica, presumiblemente producida debido a altas temperaturas.**

La fricción genera calor y este tiene que ser disipado por conducción a través de los cuerpos del sistema. A altas temperaturas ambientales la transferencia de calor del sistema hacia el ambiente es menor y se requiere menos energía friccional para fundir y soldar las microasperezas superficiales y en consecuencia el desgaste aumenta. Los materiales con alta conductividad térmica y baja capacidad calórica por unidad de volumen, presentan buena resistencia al desgaste, ya que disipan rápidamente el calor.

Generalmente a altas temperaturas la velocidad de desgaste disminuye con la disminución de las fuerzas de fricción; siendo el flujo plástico en las vecindades de los puntos más calientes lo que determina el mecanismo de desgaste. En un tribosistema el desgaste predomina en el material con menor temperatura de flujo plástico para una misma carga.

Los resultados de laboratorio indican que es necesario, en ocasiones, incrementar la temperatura ambiente, a fin de promover la formación de óxidos lubricantes inhibidores del desgaste. En otros casos es suficiente el óxido formado a esa temperatura.

En (Sarría y Hernández, 1993), se plantea que la aplicabilidad de los métodos de reacondicionamiento de piezas, depende en primer lugar de las características de explotación y tecnológico constructivas de estas, es decir:

1. Materiales y tratamientos térmicos.
2. Características de las piezas así como la conjugación de estas.
3. Tipos de desgaste.
4. Valor del desgaste.
5. Forma de las piezas que se van a reacondicionar.
6. Dimensiones de las piezas.
7. Dureza superficial.
8. Cargas a que están sometidas.

Una vez que se conozcan estos datos, se pasa a seleccionar el método de reacondicionamiento, teniendo en cuenta un conjunto de criterios como son el criterio de aplicabilidad del método, el criterio de durabilidad y el criterio técnico económico. La aplicabilidad, es un criterio preliminar el cual permite, seleccionar uno o varios métodos de recuperación para la pieza en estudio, y depende fundamentalmente, de la experiencia y dominio que el especialista posea, de los diferentes métodos que existen y dan respuesta al problema en cuestión.

El criterio de durabilidad, valora los métodos de reacondicionamiento de piezas, desde el punto de vista de la garantía de la capacidad de trabajo de la pieza que se restaura, y las propiedades de su explotación (Sarría y Hernández, 1993).

El criterio técnico económico valora que el método a seleccionar debe ser aquel que, cumpliendo el criterio de durabilidad, sea capaz de garantizar el efecto económico mayor (Sarría y Hernández, 1993). La aplicación práctica de tales criterios se torna, por lo general, compleja por la base de conocimientos que se necesitan para tales fines, la cual no existe, o no está al alcance de muchos especialistas en el momento de tomar una decisión. Es por ello que siempre, para lograr la aplicación de los criterios en condiciones de producción se hace necesario:

1. Emplear la experiencia práctica obtenida con anterioridad, sistematizándola por métodos de inferencia estadística.
2. Desarrollar pruebas y ensayos de laboratorio, que permitan obtener los elementos fundamentales a la hora de seleccionar el método de reacondicionamiento adecuado.

La tarea inicial, para el especialista dedicado a las tareas de reacondicionamiento de piezas, es determinar los mecanismos de deterioro presentes en la superficie y los niveles en que se encuentran sobre el elemento de máquina a rellenar. Una de las formas de clasificación del desgaste más extendida, se basa en los aspectos esenciales del sistema tribológico planteado, conociendo las siguientes particularidades (Martínez, 1981):

1. El tipo de movimiento relativo.
2. Los elementos que interactúan.
3. El mecanismo fundamental del desgaste.

**Formas de clasificación del desgaste según el movimiento relativo de las superficies en contacto.**

Cuerpos en contacto.	Movimiento relativo	Interacción Fundamental.			
		Tensiones		Tensiones y Contacto Mecánico.	
		1- Fatiga	2- Abrasión	3- Adhesión	Corrosivo-Mecánico
Sólido - Sólido	Deslizamiento	Si	Si	Si	Si
		Desgaste por deslizamiento.			
	Rodadura	Si	Si	Si	Si
		Desgaste por rodadura.			
	Choque	Si	Si	Si	Si
		Desgaste por choque.			
	Vibración	Si	Si	Si	Si
		Desgaste por frotamiento			
Sólido - Líquido	Flujo	Si	Si	Si	Si
		Corrosión por cavitación.			
Sólido - Líquido y Partículas	Flujo	Si	Si	Si	Si

En la Tabla siguiente, se muestra esta forma de clasificación sobre la base de estas características, donde para cada uno de las diferentes formas de movimiento relativo pueden actuar los siguientes mecanismos de desgaste: Según (Martínez, 1981), un procedimiento típico para determinar el mecanismo de desgaste. Este método indirecto se fundamenta en el estudio del aspecto externo que presenten las superficies desgastadas.

1. Por fatiga superficial.
2. Abrasivo.
3. Adhesivo.
4. Corrosivo mecánico.

**Clasificación del desgaste según el aspecto externo de la superficie de trabajo.**

<b>Tipo de desgaste.</b>	<b>Aspecto de la superficie.</b>
<b>Por fatiga superficial</b>	<b>Grietas, caries.</b>
<b>Abrasivo</b>	<b>Excoriación, arañazos, rayaduras.</b>
<b>Adhesivo</b>	<b>Protuberancias, escamas.</b>
<b>Corrosivo Mecánico.</b>	<b>Productos de reacción (Películas de óxido o partículas de otro compuesto químico).</b>

Como conclusiones de este trabajo podemos resumir que el deterioro por desgaste tiene lugar en sistemas donde interactúan pares de fricción o en aquellos donde existe la presencia de un agente activo sobre las superficies de fricción y por lo general tiene lugar bajo la acción de esfuerzos variables.

## **Bibliografía.**

- Czichos, H.; "A systems analysis data sheet for friction and wear tests and an outline for simulative testing", (5th meeting of IRG-OECD at CNRS, Paris, Abril 1976), Source Book on Wear Control Technology, Rigney, D.A. y Glaeser, W.A. (Editores), American Society for Metals, E.E.U.U. (1978), pp. 22-39.
- Eyre, T.S.; "Wear characteristics of metals", (Tribology International, Oct. 1976), Source Book on Wear Control Technology, Rigney, D.A. y Glaeser, W.A. (Editores), American Society for Metals, E.E.U.U. (1978), pp. 1-10.
- Martínez, Francisco. Influencia de la estructura metalográfica del acero 65Γ sobre la resistencia al desgaste abrasivo. Revista "Construcción de Maquinarias". N° 2. 1981. p 23 – 35.
- Rabinowicz, E.; "The wear coefficient - Magnitude, Scatter, Uses"; Journal of Lubrication Technology, Transactions of the ASME, V. 103, N° 2, (1981), pp. 188-194.
- Sarría Ruiz, Luis Armando; Hernández Gutiérrez Dimas. Criterios para la selección del método racional de recuperación de piezas. Manual de recuperación de piezas. Centro de Investigaciones Metalúrgicas. CIME. Instituto Cubano del Libro. Ciudad de La Habana.1993. p 335 – 348.
- Torres Alpízar Eduardo. Estudio de la influencia del Cr o el Ni en las propiedades mecánicas y funcionales de depósitos de soldadura de acero austenítico al alto manganeso. Tesis presentada en opción al grado científico de doctor en ciencias técnicas. Universidad Central de las Villas "Marta Abreu". Facultad de Mecánica. 2002. pp 212
- Vázquez, J.C. Elementos de control del Desgaste. Escuela de Ingeniería Mecánica - Facultad de Ingeniería - Universidad Central de Venezuela. Caracas. Venezuela. Abril 1997. pp 20